

ESTUDIO DE LA MAQUINABILIDAD DE ALEACIONES DE ALUMINIO-COBRE

Borja Sánchez Almirón ⁽¹⁾, María Vega Aguirre Cebrián ⁽²⁾, Félix Calvo Narváez ⁽²⁾, Ignacio González Requena ⁽²⁾, Alfredo Sanz Lobera ⁽²⁾

*(1) Ingeniero Técnico Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid, 606821133
b.s.almiron@gmail.com*

*(2) E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio, Departamento de Materiales y Producción
Aeroespacial, Plaza Cardenal Cisneros, 3. 28040 Madrid; 913367492;
mariavega.aguirre@upm.es; felix.calvo@upm.es; igr@aero.upm.es; a.slobera@upm.es*

Resumen

El cometido principal es establecer una metodología para analizar y evaluar la maquinabilidad de una aleación aluminio-cobre mecanizada en torno utilizando los recursos disponibles en los laboratorios de materiales y producción. El estudio se realizó mediante la medida del caudal de viruta, el dimensionado de la herramienta durante el proceso y su análisis microscópico. También se estudió el posible desgaste de la herramienta y qué factores han podido incrementar o disminuir dicho valor.

Se han mecanizado ocho barras de una aleación 2030 T4 con dos herramientas de corte idénticas de carburo de wolframio. Esto permite usar cada filo de corte cada dos pasadas.

No se obtuvo una medida de la maquinabilidad, sin embargo, el análisis de las variables de entrada y de salida concluye con la verificación de una buena maquinabilidad del material. Este estudio puede servir de referencia para el estudio de otras aleaciones de aluminio de forja.

Palabras Clave: maquinabilidad, aluminio, corte, torno, herramienta.

Abstract

The main goal of this work is to establish a methodology to analyze and evaluate the machinability of a wrought aluminium-copper alloy mechanized in a lathe using the available facilities in the laboratories of materials and manufacturing. The research it is made through the measurement of cutting material volume, dimensions of cutting tool during the process and its microscopic analysis. The possibility of cutting tool wear was studied, as well as which factors could enhance or decrease this value.

Eight extruded bars of A2030 T4 have been mechanized by turning with two equal cemented carbide tools. This allows using each tool edge for two machining passes.

A measurement of machinability was not obtained however analysis of input and output variables concludes with the verification of a good machinability of material. The results of this work could be a reference to study the machinability of other wrought aluminium alloys.

Keywords: machinability, aluminium, tool, wear, lathe.

1. INTRODUCCIÓN

La experiencia ha demostrado que existen grandes diferencias a la hora de mecanizar diversos materiales debido a las características o propiedades que muestran éstos al ser procesados. Por lo tanto, existe la necesidad de medir y evaluar esas diferencias. En este punto entra en juego la maquinabilidad, que se puede definir como “un factor asignado a cada material para indicar la facilidad o dificultad en el mecanizado de materiales” [1].

De modo que mide la resistencia que opone un material al ser procesado mecánicamente (o químicamente). Esta característica cuantifica el proceso de mecanizado y puede ser definida para una aplicación específica por varios criterios, tal como el material y geometría de la herramienta de corte, la operación y condiciones del mecanizado, lubricación en el corte y un largo etcétera que es dependiente de estos últimos.

Éste es uno de los factores que nos hace cuestionar qué herramientas utilizar y qué material es el más adecuado para dicha herramienta, cuáles son los procesos que serán más efectivos al producir un determinado componente, así como qué máquina-herramienta ofrecerá un mayor rendimiento en el corte. Este factor es una de las principales causas de la gestión del tiempo en una empresa dedicada a la producción debido a que es un fiel indicador del tiempo requerido por operación, y también del coste por operación.

1.1. Objetivos

La finalidad principal de este proceso empírico es analizar y evaluar la maquinabilidad de una aleación de Al-Cu mecanizada en torno, utilizando para ello el caudal de viruta, junto con el análisis microscópico y dimensional de la herramienta de corte. También se estudiará el posible desgaste de la herramienta y qué factores han podido incrementar o disminuir dicho valor, así como evaluar los diversos mecanismos de desgaste en las herramientas de corte.

1.2. Estudios realizados en maquinabilidad

Los índices de maquinabilidad para diferentes materiales pueden ser desarrollados mediante el uso de un tipo de herramienta de corte que someteremos a unas variables de corte, cuya influencia se comprobará haciendo aplicación del concepto “ceteris paribus”, al dejar constantes todas las variables salvo la que se desea evaluar. Estas clasificaciones, no obstante, pueden cambiar ya que las condiciones de corte o los materiales de las herramientas también pueden modificarse. Los

ensayos sobre maquinabilidad son llevados a cabo en diferentes formas, pero generalmente incluyen los siguientes [2]:

- Ensayos de vida de la herramienta y desgaste de la misma
- Ensayos de acabado superficial
- Ensayos basados en las fuerzas de corte
- Ensayos de consumo de potencia
- Ensayos de temperatura en el corte

La vida de la herramienta es generalmente considerada como la cantidad de tiempo que la herramienta produce piezas con un acabado aceptable y/o tolerancias mientras no muestre suficiente desgaste como para estar en peligro por fallo catastrófico [2].

El ensayo que se ha llevado a cabo ha seguido las líneas del estudio de vida de la herramienta y su desgaste, en el que la clasificación de la maquinabilidad se determina mediante pruebas a una velocidad (entiéndase constante) en una variedad de materiales de trabajo, utilizando un determinado material de la herramienta y una geometría concreta. Se halla el tiempo de trabajo de la herramienta necesario para generar una cantidad predefinida de desgaste en la misma, y los índices de maquinabilidad son asignados en base a la vida de la herramienta relativa para los respectivos materiales [2].

2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

En esta sección se van a describir los ensayos de mecanizado que se han realizado, así como los detalles de todos los procesos por los que han pasado los diferentes elementos. Además se incluirá la nomenclatura referente a todos los ensayos.

Con estos exámenes se ha tratado de determinar la maquinabilidad de la aleación y el desgaste de las herramientas de carburo, a través de los mecanizados a dos velocidades de corte constantes con parámetros de avance y profundidad de corte también determinados.

Para conseguir tal meta se han mecanizado ocho barras extruidas de una aleación de Aluminio-Cobre 2030 T4 con dos plaquitas de carburo de wolframio con recubrimiento de TiN. Después de cada mecanizado se han realizado medidas de dureza en las probetas de aleación para comprobar si,

en algún caso, se ha producido alguna alteración apreciable en las propiedades del material. Además se han pesado todas y cada una de las muestras mecanizadas (virutas) para medir así el caudal de viruta arrancado. Las virutas han resultado de tipo helicoidal y continuas, como corresponden a un material dúctil, y tanto más largas cuanto menor era la velocidad de rotación, con la excepción de los ensayos A1 y A2 que daban aspecto de viruta discontinua, por el avance reducido. Posteriormente cada herramienta de corte se ha analizado mediante microscopía SEM (Scanning Electron Microscopy) para determinar la composición de las mismas y dimensionar los efectos que ha podido producir el mecanizado.

2.1. Descripción de los ensayos de mecanizado en torno paralelo

En todo proceso de corte es importante hacer un estudio preliminar de las variables que se van a emplear. Así, previamente a la mecanización de las barras se ha hecho una selección de los valores deseables a alcanzar en las pruebas. Estos valores se han determinado en base a la velocidad de rotación que podía proporcionar la máquina, sin obtener errores significativos en las medidas, y en función de la herramienta disponible. Se constató que las velocidades de corte debían ser prácticamente constantes, con unos valores que están en torno a 63 m/min y 92 m/min, debido al propio sistema de control de las revoluciones del torno. Se han utilizado para todas las operaciones dos herramientas de carburo con triple recubrimiento de TiN/TiCN/Al₂O₃ que tienen ambas 6 filos de corte. Estos filos de corte están representados en las tablas siguientes y la numeración se indica como sigue: el primer dígito designa el número de plaquita (1 ó 2), la letra (a ó b) caracteriza la cara de la herramienta y la tercera cifra representa los filos por cada cara (1, 2 ó 3).

2.1.1. Condiciones iniciales

Para los ensayos A, B, y C se ha usado un torno paralelo Harrison V390 con una potencia de 7,5 kW (10 CV) en el husillo principal [3]. Cada ensayo consta de 8 condiciones (i1, i2,..., i8) con i=A, B, C. De esta manera se realizan 24 operaciones de mecanizado.

Asimismo, en el movimiento de avance de la herramienta se han empleado dos valores para dicho parámetro de 0,1 y 0,18 mm/rev que se corresponden con dos test por cada valor, es decir, se repiten 12 veces dos a dos (Tabla 1). Por lo tanto, se han utilizado las herramientas de corte dos a dos; esto es, para los ensayos A1/A2 se ha usado la primera plaquita con el filo 1, para los ensayos A3/A4 se ha utilizado la segunda plaquita con el filo 1 y así sucesivamente.

Las operaciones se han basado en el cilindrado de 8 barras que parten de una longitud y diámetro de 250 mm y 50 mm respectivamente, con una profundidad de pasada de 3 mm en todas las operaciones realizadas, por lo que se puede ver en las tablas la disminución de 6 mm en el diámetro de las probetas. Todas las operaciones en las barras se han realizado en seco, es decir, no se ha utilizado ningún lubricante para no disminuir el efecto de desgaste en la herramienta.

Tabla 1. Valores deseables en el ensayo A¹.

Test	FILO	N _{Teórica} (rpm)	p (mm)	a (mm/rev)	D _{lij} (mm)	V _{Cij} (m/min)
A1	1a1	400	3	0,1	50	62,83
A2	1a1	400	3	0,1	50	62,83
A3	2a1	400	3	0,18	50	62,83
A4	2a1	400	3	0,18	50	62,83
A5	1a2	600	3	0,1	50	94,25
A6	1a2	600	3	0,1	50	94,25
A7	2a2	600	3	0,18	50	94,25
A8	2a2	600	3	0,18	50	94,25

2.1.2. Descripción del cilindrado de las probetas

El proceso de cilindrado se ha realizado de manera rigurosa para prevenir posibles contaminaciones en el proceso.

Para la sujeción de la barra se ha utilizado el plato universal de garras cónico de tres puntos. Además, a fin de evitar fenómenos de flexión en la barra que pudieran ocasionar efectos negativos en el mecanizado como vibraciones indeseadas, se ha utilizado el contrapunto en su sujeción ya que la longitud de las probetas de ensayo era excesiva. Para sujetar la herramienta se ha utilizado el portacuchillas cuádruple, en el que se ha dispuesto el portaherramientas de Seco Tools.

Una vez anclada la barra, el operario ha dispuesto los valores de profundidad de pasada y de avance mientras la barra permanecía girando.

El siguiente paso ha consistido en elegir las revoluciones deseadas según el estudio previo, a través del mecanismo selector del torno. Este mecanismo lleva una rueda exterior, que al girarla en sentido horario permite aumentar la velocidad de rotación. El sistema de control electrónico no consiguió mantener las revoluciones en un valor estable durante toda la operación, si bien no hubo

¹ En los ensayos B y C se han utilizado 455 y 526 rpm, respectivamente, para las revoluciones más bajas y, 682 y 790 rpm, respectivamente, para las revoluciones más altas. A partir del ensayo B5/B6 se empieza a utilizar la cara b de las herramientas de corte.

grandes diferencias, y además fueron anotados los valores iniciales y finales para evaluar errores. En este sentido conviene señalar que los procesos de corte no son ideales, por lo que las revoluciones en el eje no sólo dependen del dispositivo citado.

La toma de tiempos durante cada cilindrado se ha realizado con un cronómetro de mano para determinar el tiempo de mecanizado. Tras cada mecanizado se dejaron enfriar las barras durante media hora y acto seguido se midió la dureza superficial de las barras en tres puntos (65 HRB). Se demuestra que la temperatura no ha tenido relevancia sobre la dureza superficial.

Es preciso señalar que se realizaron 4 mecanizados cada día de ensayo, 2 mecanizados por cada filo y plaquita respectivamente. Esto se realizó para el posterior estudio de las plaquitas de corte en el microscopio y evitar así la posible contaminación de las herramientas de corte.

3. RESULTADOS

En base a los trabajos realizados durante la campaña experimental se han obtenido los siguientes resultados.

3.1. Rugosidad

Los valores de rugosidad de un tipo de material u otro dependen en gran medida de la herramienta de corte y de su geometría, de la precisión de la máquina herramienta y de las condiciones de corte empleadas. De esta forma, este valor da una idea de la calidad del mecanizado y a su vez, de lo fácil o difícil que resulta mecanizar un material en general.

Tabla 2. Rugosidades obtenidas con rugosímetro SM7 Profil Test para las barras procedentes de los ensayos C1-C8

ENSAYOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Ra (μm)	1,83	2,15	1,93	2,57	2,18	2,05	1,92	2,21

En el caso particular del ensayo descrito, los valores de rugosidad se han adaptado de forma correcta a los valores esperados para el tipo de operación que se empleó, una operación de desbastado. En la tabla anterior (Tabla 2) se muestran los resultados obtenidos para los mecanizados C1-C8. Durante estos ensayos, con el software empleado, se han almacenado todos los perfiles de rugosidad de las 8 barras para poderlos representar gráficamente en 2D.

Los valores de rugosidad están entre los valores típicos de desbastado, pero tendiendo a fino, que se corresponden con las condiciones de corte establecidas para estos cilindrados. El grado de rugosidad media aritmética R_a está en torno a un N7 de los valores de la norma ISO 1302:1992 [4].

El uso de esta norma permite comparar de forma sencilla los grados de tolerancias ISO con los valores del grado de rugosidad. En nuestro caso la herramienta de corte dura y nueva, junto con un torno poco utilizado, han contribuido notablemente a que el acabado superficial de nuestras piezas sea excelente, y por tanto, reafirme la buena maquinabilidad de esta aleación.

3.2. Caudal de viruta a arrancar y formada.

En términos de caudal, si se considera el volumen de material a arrancar en un minuto, en mm^3/min , se tendrá

$$Q_c = S_c \cdot V_c \cdot 10^3 \quad (1)$$

siendo V_c la velocidad de corte [5].

El valor del caudal de viruta a arrancar es importante porque da una idea del valor deseable que se quiere obtener. No obstante, en la realidad esto casi nunca se cumple ya que los valores obtenidos son siempre menores de lo esperado.

Tabla 3. Valores del caudal de viruta a arrancar con las velocidades de corte obtenidas en el proceso.

TEST	a mm/rev	ENSAYO A			ENSAYO B			ENSAYO C		
		V_{Cij} m/min	Q_c mm^3/min	t_{ij} s	V_{Cij} m/min	Q_c mm^3/min	t_{ij} s	V_{Cij} m/min	Q_c mm^3/min	t_{ij} s
1	0,1	63,62	19085	368	62,69	18806	328	62,91	8874	282
2	0,1	63,85	19156	359	62,96	18889	329	62,85	18856	284
3	0,18	63,38	34226	212	63,03	34038	189	62,85	33941	164
4	0,18	62,91	33972	215	62,89	33963	189	62,56	33780	164
5	0,1	94,56	28369	247	95,17	28551	215	94,91	28472	187
6	0,1	94,88	28463	245	94,55	28365	217	94,61	28383	188
7	0,18	94,56	51063	142	94,41	50982	126	94,97	51282	108
8	0,18	94,17	50851	143	94,41	50982	126	94,61	51089	108

El caudal de viruta a arrancar (Tabla 3) se calcula mediante la expresión (1) sin más que tomar en cuenta las velocidades de corte y la superficie de corte, suponiendo en cada caso, $a=cte$ y $p=cte$. En la notación anglosajona, el avance (a) se escribe f , y la profundidad de pasada (p) se denota por a_p . Nótese cómo en cada ensayo se incrementa el caudal a medida que disminuye el tiempo. Esto ocurre porque, aunque la velocidad de corte se mantenga prácticamente constante, las revoluciones aumentan y por lo tanto se arranca más material por revolución.

Si se considera el caudal de viruta formada, es decir, el volumen de viruta formada en un minuto (mm^3/min), se tendrá

$$Q_v = S_f \cdot V_f \cdot 10^3 \quad (2)$$

siendo V_f la velocidad de salida de la viruta (o velocidad de fricción) y S_f la superficie de la viruta arrancada.

Tabla 4. Valores del caudal de viruta arrancado para los valores del avance y la velocidad de corte ($p = 3\text{mm}$)

TEST	a mm/rev	ENSAYO A			ENSAYO B			ENSAYO C		
		V_{Cij} m/min	Q_v mm ³ /min	t_{ij} s	V_{Cij} m/min	Q_v mm ³ /min	t_{ij} s	V_{Cij} m/min	Q_v mm ³ /min	t_{ij} s
1	0,1	63,62	17279	368	62,69	18655	328	62,91	17505	282
2	0,1	63,85	17277	359	62,96	18068	329	62,85	17731	284
3	0,18	63,38	30481	212	63,03	31686	189	62,85	30637	164
4	0,18	62,91	30674	215	62,89	31374	189	62,56	30491	164
5	0,1	94,56	26532	247	95,17	27544	215	94,91	26941	187
6	0,1	94,88	26884	245	94,55	27235	217	94,61	26851	188
7	0,18	94,56	45676	142	94,41	47085	126	94,97	47130	108
8	0,18	94,17	46100	143	94,41	47020	126	94,61	46691	108

El volumen de viruta arrancado se obtiene experimentalmente del propio mecanizado a partir de la diferencia en peso que ha tenido la pieza de trabajo y a través de la densidad del material calculada por la geometría de las barras. Es preciso puntualizar que la densidad del material se ha calculado como media aritmética de todas y cada una de las densidades independientes de las probetas, coincidiendo ésta con la esperada para este tipo de material ($2,79 \text{ g/cm}^3$).

Entonces el volumen de viruta arrancado se calcula con la siguiente expresión

$$Q_v = \frac{WI_{ij} - WF_{ij}}{\rho} \text{ (mm}^3\text{)} \quad (3)$$

Siendo WI_{ij} y WF_{ij} el peso inicial y final respectivamente en cada una de las operaciones. A continuación se muestra la tabla correspondiente al caudal de viruta formada.

La teoría evidencia que se ha de cumplir la conservación de la masa pues al mecanizar, el caudal de viruta a arrancar y el caudal de viruta arrancado han de ser iguales. A la vista de los resultados, esta hipótesis no se cumple debido a la alta variabilidad del proceso. Durante el mecanizado se han

tomado los tiempos con un cronómetro y han sido llevados a cabo por un operario lo que supone un cierto error de apreciación en los tiempos. Además, el operario de la máquina incrementa también la incertidumbre ya que los ensayos llevados a cabo, aunque realizados en las mejores condiciones, están sujetos a errores de apreciación. Asimismo, durante los mecanizados, se observaba que la máquina no iba siempre acorde a las revoluciones fijadas, ya que oscilaba entre valores de ± 5 rpm (en los cálculos se ha tomado la media aritmética de las medidas al inicio y al final de las revoluciones, esto de por sí, implica un cierto error), es decir, la velocidad no resultó rigurosamente constante. Por lo tanto, se presentan seguidamente los errores cometidos en las operaciones de corte.

Tabla 5. Caudal de viruta a arrancar frente a caudal de viruta arrancado con los correspondientes errores relativos

ENSAYO A			ENSAYO B			ENSAYO C		
Q_c mm ³ /min	Q_v mm ³ /min	ε_Q %	Q_c mm ³ /min	Q_v mm ³ /min	ε_Q %	Q_c mm ³ /min	Q_v mm ³ /min	ε_Q %
19085	17279	9,5	18806	18655	0,8	18874	17505	7,3
19156	17277	9,8	18889	18068	4,3	18856	17731	6,0
34226	30481	10,9	34038	31686	6,9	33941	30637	9,7
33972	30674	9,7	33963	31374	7,6	33780	30491	9,7
28369	26532	6,5	28551	27544	3,5	28472	26941	5,4
28463	26884	5,5	28365	27235	4,0	28383	26851	5,4
51063	45676	10,6	50982	47085	7,6	51282	47130	8,1
50851	46100	9,3	50982	47020	7,8	51089	46691	8,6

En los gráficos siguientes se presentan las relaciones existentes entre el caudal de viruta a arrancar (teórico) y el caudal de viruta formado (real) en función del avance y la velocidad de corte, respectivamente. Según demuestra la experiencia, estas curvas varían de forma cuadrática, sin embargo, al realizar únicamente dos tipos de ensayos (avances entre 0,1 y 0,18 mm y; velocidades de corte entre 63 y 92 m/min), las curvas se asemejan a la variación lineal. No obstante, el aumento de los valores de los parámetros de corte, corroboran el aumento de la pendiente descrito por la experiencia. Por lo tanto, se deduce que los datos obtenidos coinciden bastante aproximadamente con los resultados previstos por la teoría del corte de metales.

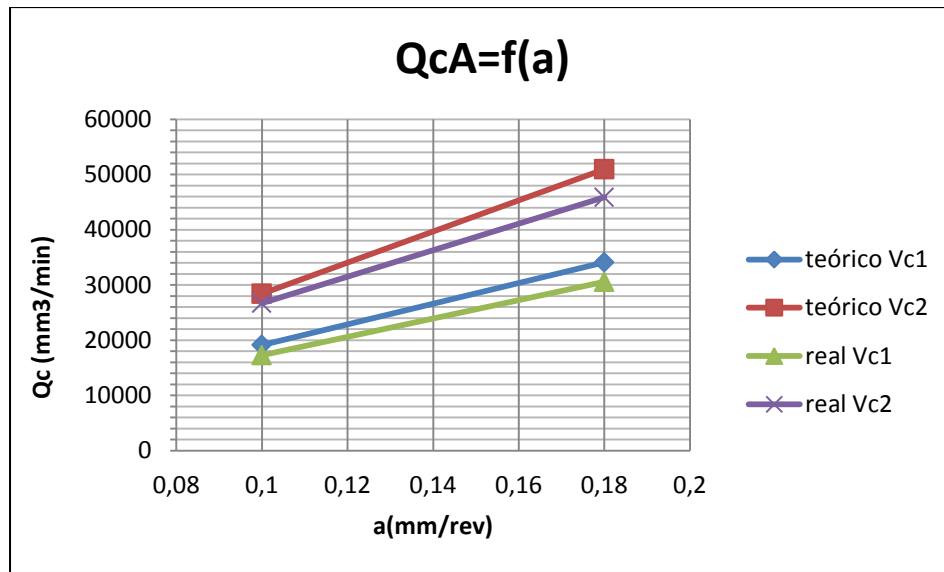


Gráfico 1. Caudal de viruta en función del avance (a)

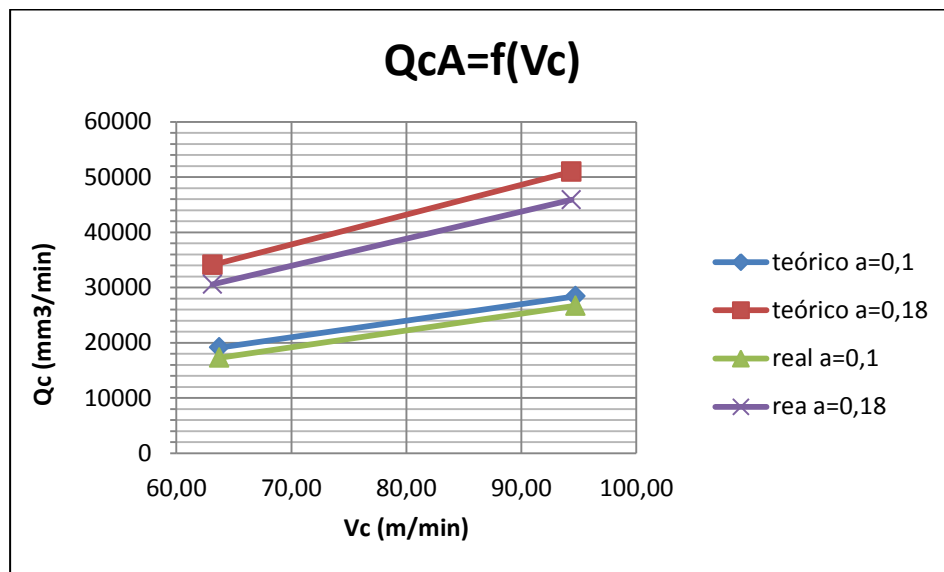


Gráfico 2. Caudal de viruta en función de la velocidad de corte (V_c)

3.3. Desgaste de las herramientas

La siguiente ilustración comparativa muestra los resultados obtenidos en el SEM en relación al desgaste obtenido.

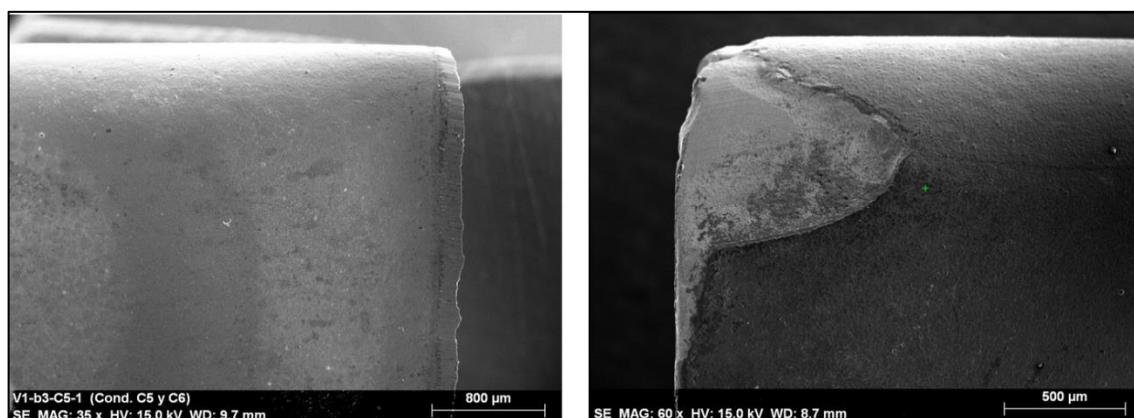


Figura 1. Desgaste severo en entalla (imagen dcha.) frente al de la herramienta del ensayo C

En la imagen de la izquierda se puede observar el filo de corte de la herramienta correspondiente al mecanizado C5/C6 con las condiciones más severas de la plaquita 1. En la imagen de la derecha, una herramienta de corte utilizada para mecanizar un acero durante 6 horas de tiempo de trabajo.

En la herramienta de la derecha se advierte un acusado desgaste de entalla como consecuencia seguramente de la oxidación y de la fricción. La curva que describe tiene aproximadamente una longitud de 950 μm hasta el vértice. Se puede apreciar cómo ha desaparecido el recubrimiento dejando la superficie del compuesto interior al descubierto. Además se ve el desgaste en cráter en la parte izquierda de la imagen que se debe al mecanismo de difusión generado por las altas temperaturas de trabajo en la herramienta. En contraposición, en la herramienta de la izquierda no se observa desgaste alguno debido a los reducidos ensayos practicados en dicha herramienta.

4. CONCLUSIONES

Se puede decir que la aleación estudiada tiene una buena maquinabilidad, pero para hallar el índice de maquinabilidad es necesario realizar los ensayos siguiendo los estándares normalizados disponibles para aceros, al no disponer de una norma con estándares para aleaciones de aluminio.

La huella de desgaste en la cara de desprendimiento de la herramienta no se ha podido determinar, y convendría poner unas condiciones de corte más severas, o colocar una herramienta de menor dureza para esta aleación. Por otra parte, se evidencia la necesidad de emplear una máquina herramienta con una regulación de velocidades de giro más sensible, así como realizar un número superior de ensayos para obtener valores medios y desviaciones típicas que proporcionen una significación estadística superior a los resultados obtenidos, así como disponer de materiales de

contraste con la aleación ensayada. La aleación 2024 T4, que se menciona en la norma de aceros, y muy utilizada en la industria aeronáutica, será objeto de los próximos ensayos que realicemos.

Se ha empleado el volumen de viruta arrancado en la unidad de tiempo como parámetro para medir la maquinabilidad. También se podría haber utilizado como otro factor de medida de maquinabilidad la potencia específica de corte, que es el cociente entre la potencia empleada en el mecanizado y el caudal de viruta arrancado.

Se ha definido una metodología capaz de caracterizar las aleaciones de Al-Cu para uso aeronáutico, desde el punto de vista de su maquinabilidad, lo que permite a alumnos de último curso de carrera desarrollar sus trabajos manteniendo la repetibilidad de sus ensayos y el rigor científico.

Referencias bibliográficas

- [1] ASM Metals Handbook, Machining, Vol. (16), ASM International, (1988).
- [2] ASM International Handbook Committee, "Machinability Test Methods: Development Machining Processes", ASM International, (1989).
- [3] HARRISON, Colchester. [Online]. <http://www.colchester-harrison.com/products/prod>.
- [4] Norma EN-ISO 1302, "Especificación geométrica de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos", ISO/AENOR, (2002).
- [5] CALVO NARVÁEZ, F., "Variables de corte en el mecanizado. Máquinas-Herramientas 1ª Parte", Publicaciones de Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica, pp. 8-12, (2009).
- [6] ASM Metals Handbook, "Introduction to Machining Processes", ASM International, (1989).
- [7] ASM Metals Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM International, (1990).
- [8] BLACK, E.T. KOHSE, R.A., DEGARMO, E.P., "Materiales y procesos de fabricación", Ed. Reverté, Barcelona, (1994).
- [9] KALPAKJIAN, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Ch. 9, Addison Wesley, 3rd ed, (1997).
- [10] MICHELETTI, G.F., "Mecanizado por arranque de viruta", Edit. Blume, Barcelona, (1980).